

4. 下水道管路施設に起因する道路陥没のメカニズム

下水道管路施設が原因となって発生する道路陥没のメカニズムについては、国総研における実験結果の他、国内2つの文献（文献1¹⁾及び文献2²⁾）と海外の1つの文献3³⁾）がある。ここでは、国総研実験結果及び文献における道路陥没メカニズムを紹介する。

●代表文献

- 1) 佐藤真理、道路陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に関する基礎的検討、東京大学卒業論、<http://geo.iis.u-tokyo.ac.jp/material/documents/msatoBAthesis.pdf>（2009.10月末現在）
- 2) 野中茂他、X線CTを用いた破損形状の違いによる管渠周辺地盤のゆるみ領域の評価、第41回地盤工学研究発表会、2006年7月
- 3) Sewerage Rehabilitation Manual 4th Edition Book, ISBN: 9781898920397, WRC, 2001

(1) 国土技術政策総合研究所における実験⁴⁾ ⁵⁾ ⁶⁾

国土技術政策総合研究所では、道路陥没のメカニズムを把握するために、下水道管渠破損部分への地盤材料の引き込みに関する実験を行った。

道路陥没は、下水道管渠の破損部分への地盤材料の引き込みが発端となり、地盤中に空洞・ゆるみが発生して生ずると考えられる。空洞・ゆるみの進展は、地下水位及び地盤材料の条件が影響すると考えられるが、地下水位については、降雨により上下動することが予想され、ある時点の現場地下水位データをそのまま採用することは適切でないので、安全側を想定する必要がある。そこで降雨後を想定して地下水位を管頂100cmに固定し、地盤材料、管渠の破損程度と空洞・ゆるみ領域の進展の関係について比較する実験を行った。

1) 実験方法

下水道管渠の埋設状況を再現するため、実験土槽で実験を行った。実験土槽の寸法は高さ100cm×幅160cm×奥行き50cmである（図-4.1）。底板の中央部に10cmの開口部があり、その上部に半分に切ったφ200塩ビ管を設置した。この塩ビ管には下水管渠の破損部分を想定してスリットを設け、ここから流入する土砂を底板の開口部から採取できる構造とした。土槽内の水位は、土槽底板の中央部にマンメータにより観測した。

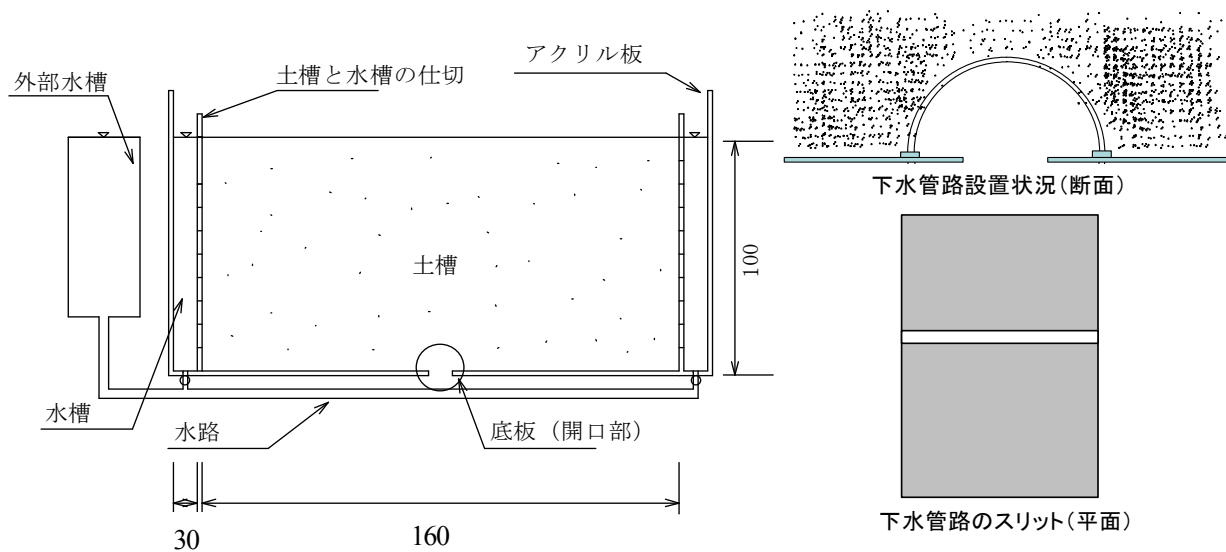


図-4.1 実験土槽



写真-4.1 地盤材料設置状況



写真-4.2 地盤設置完了



写真-4.3 色砂設置状況

地盤材料の設置方法は、設定含水比に調整した地盤材料を、規定の密度となるよう重量を測定しながら、一層当たり 10cm、全層で 100cm の厚さに盛り立てた (写真-4.1、写真-4.2)。また、実験終了後に地盤のゆるみ・空洞領域を観測するため、層間に色砂を設置した (写真-4.3)。

実験条件は Case1～10 までの全 10 ケースを設定した (表-4.1)。スリット形状は、予備実験⁵⁾において管軸方向と管周方向の 2 種類の形状で実験を行ったが、形状による空洞・ゆるみへの影響はほとんどなかったことから、継ぎ手ズレや管周方向のクラックを想定し、管周方向に投影長さが約 20cm になるように設定した。なお、開口幅は 5、10、15mm の 3 種類とした。

地盤材料は礫質土の材料 A、礫混じり砂の材料 B および山砂の材料 C を使用した。本実験で用いた地盤材料は、購入土の粒径分布調査事例⁵⁾を参考にして、粒径の大きい材料 A、粒径が小さく細粒分の多い材料 C、それらの中間的な粒径である粒径 B の 3 種類を調整した (図-4.2、表-4.2)。埋戻しの管理基準として、品質規定をしている地方公共団体では、最大乾燥密度の 90%以上としている⁵⁾。本実験では締固め度を 90%、80%の 2 種類を設定し、適正に埋め戻された場合と埋め戻しが不十分な場合を比較した。

実験開始は、塩ビ管のスリットのシーリングを除去して行い、実験終了は、スリットからの排砂が見られなくなる時点若しくは地表面の陥没が観測される時点とした。スリットから排出される地盤材料を順次いくつかの大型トレイで受け、回収時間と乾燥重量を測定した。

表-4.1 実験条件の設定

Case	スリット方向	地盤材料	開口部 (mm)	締固め度 (%)	水位 (cm)
1	管周方向	材料A	10	90	100
2		材料B	10		
3		材料C	10		
4		材料B	5		
5		材料C	5		
6		材料A	15		
7		材料C	15		
8		材料C	5	80	
9		材料C	10		
10		材料A	10		

表-4.2 地盤材料の土質分析結果

材料	土粒子密度 (g/cm ³)	最大密度 (g/cm ³)	90%密度 (g/cm ³)	80%密度 (g/cm ³)	最大粒径 (mm)	D ₉₅ (mm)	細粒分含有率 (%)	最適含水比 (%)
材料A	2.632	1.883	1.695	1.506	9.5	7.0	0.3	10.8
材料B	2.644	1.766	1.589	1.413	9.5	3.0	1.8	14.4
材料C	2.689	1.737	1.563	1.390	4.75	0.6	11.1	17.0

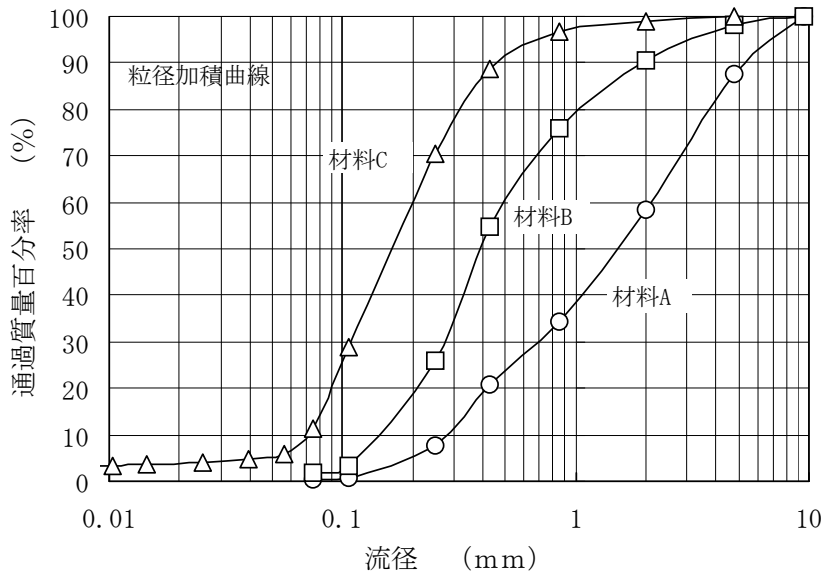


図-4.2 地盤材料の粒径分布

2) 実験結果

表-4.3 に実験結果を示す。

表-4.3 実験結果

No.	材料種別	スリット幅 mm	締固度 %	水位 cm	状況	経過時間 min	排出土量 乾燥重量kg	時間当り排土量 kg/min
CASE1	材料A	10	90	100	陥没	4.3	3.44	0.79
CASE2	材料B	10	90	100	陥没	5.5	44.80	8.15
CASE3	材料C	10	90	100	排砂	1,440.0	11.05	0.01
CASE4	材料B	5	90	100	排砂	60.0	1.08	0.02
CASE5	材料C	5	90	100	排砂	360.0	2.88	0.01
CASE6	材料A	15	90	100	排砂	3.0	25.34	8.45
CASE7	材料C	15	90	100	陥没	1.0	12.36	12.36
CASE8	材料C	5	80	100	排砂	360.0	3.64	0.01
CASE9	材料C	10	80	100	陥没	10.0	12.36	1.24
CASE10	材料A	10	80	100	排砂	180.0	2.40	0.01

※経過時間:スリットからの土砂の排出が終了するまでの時間、もしくは陥没が発生するまでの時間。

①地盤材料の違いによる土槽変化特性

地盤材料A・B・Cの3種類別に実験結果を整理すると、山砂を使用した実験ケースでは、他の地盤材料を使用したケースよりも明らかに、土砂の排土量が少なかった。

また、排土終了に至までの経過時間も短いことから、山砂による埋め戻しは、急激な崩壊（陥没）を招きにくいという結果が得られた。

②スリット幅の違いによる土槽変化特性

5 mm、10 mm、15 mmの3ケースのスリット幅について実験を行った結果、スリット幅が大きいほど、排土量が多くかつ短時間に土砂が流出される傾向にあった。

③締固度の違いによる土槽変化特性

締固度80%と90%の種類について実験を行った結果、地盤材料C（山砂）のケースでは排土量及び排土終了に至までの経過時間に違いが見られなかったが、地盤材料A（礫質土）のケースでは締固めが不十分な場合に急激な土砂崩落（陥没）が見られる結果になった。

④ゆるみ領域の観測

各実験ケースのゆるみ領域を観測するため、地盤材料を10cm毎に掘削した。色砂を設置した同一平面で色砂を観測できない状態をゆるみと定義した。地表面陥没した実験ケースについて、case2及びcase6は地表面がすり鉢状に陥没していた（写真-4.5、写真-4.9）。それに対して、case9ではゆるみ領域全体が陥没していた（写真-4.12）。地表面陥没しておらず、地盤材料の累計乾燥重量が少ない実験ケースでは、(case4、case5、case8))は、管頂30cm程度までゆるみが広がった。ただし、case1については、地盤材料の累計乾燥重量が少なかったものの、地表面近くまでゆるみ領域が広がっていた（写真-4.4）。

材料Cの実験ケース（case3、case5、case7、case8、case9）では、他の材料を用いた実験ケースに比べて、ゆるみ領域が水平方向に進行する傾向が見られた。それに対して、材料A、材料Bでは、ゆる

み領域が地表面に達する時間が早く (case2、case6)、地盤材料の累計積乾燥重量が少なかった case1でも地表面付近までゆるみ領域が広がっていたことから、鉛直方向にゆるみやすい可能性が示唆された。



写真-4.4 case1 ゆるみ観測状況(管頂 80、50、10、0cm)



写真-4.5 case2 ゆるみ観測状況(管頂 90、60、20、0cm)



写真-4.6 case3 ゆるみ観測状況(管頂 40、30、10、0cm)

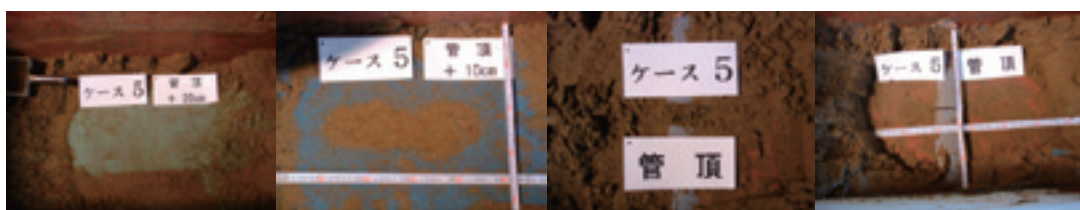


写真-4.7 case4 ゆるみ観測状況(管頂 20、10、0cm)



写真-4.9 case6 ゆるみ観測状況(管頂 90、70、20、0cm)



写真-4.10 case7 ゆるみ観測状況(管頂 30、20、10、0cm)



写真-4.11 case8 ゆるみ観測状況(管頂 30、20、10、0cm)



写真-4.12 case9 ゆるみ観測状況(管頂 90、60、20、0cm)



写真-4.13 case10 ゆるみ観測状況(管頂 80、30、10、0cm)

3) まとめ

- 山砂による埋め戻しは、他の粒径の粗い地盤材料に比べて、急激な土槽の崩壊を招きにくく、埋め戻し土として有効であることが分かった。
- スリット幅が 10 mm を超えると、地盤材料の種類を問わず土砂崩壊の危険性が著しく増加する。下水道施設維持管理指針では、事故を未然に防止するための判断基準として、クラック幅が 5 mm 以上をランク A としているが、これを裏付ける結果となった。

【参考文献】

- 4) 小橋秀俊・桑野玲子・堀井俊孝、平成 16 年度下水道関係調査研究年次報告書 国土技術政策総合研究所資料 No. 263
- 5) 藤生和也・浜田知幸、道路陥没を予防するための下水道管路の適正管理手法に関する研究、平成 17 年度下水道関係調査研究年次報告書 国土技術政策総合研究所資料 No. 323
- 6) 藤生和也・浜田知幸、下水道管渠の適正な管理手法に関する研究、平成 18 年度下水道関係調査研究年次報告書 国土技術政策総合研究所資料 No. 404

(2) 佐藤真理：道路陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に関する基礎的検討（文献1）

佐藤の論文には、綿密な実験と考察、さらにはわかりやすい解説図がある。論文ではまず、「下水管破損部への土砂の流出における降雨の影響としては、大まかにわけて以下の3つ①降雨浸透水の管渠内への流出にともなう土砂流出・②地下水位上昇による水の管渠内への流出にともなう土砂流出・③集中豪雨時の管内水の周辺地盤への流入・排出にともなう土砂流出が主に考えられる。どのプロセスも詳細については未だ不明な点が多く未だ概念的な状態である。」としている。

①について、図-4.3 を示し、「降雨が地表から浸透し下水管破損部に流入する過程で土砂が水と共に流出していくというプロセスである。しかしながら現在都市部においては地表面の多くが道路舗装をされているため降雨の浸透は発生しにくい可能性が高い。」としている。

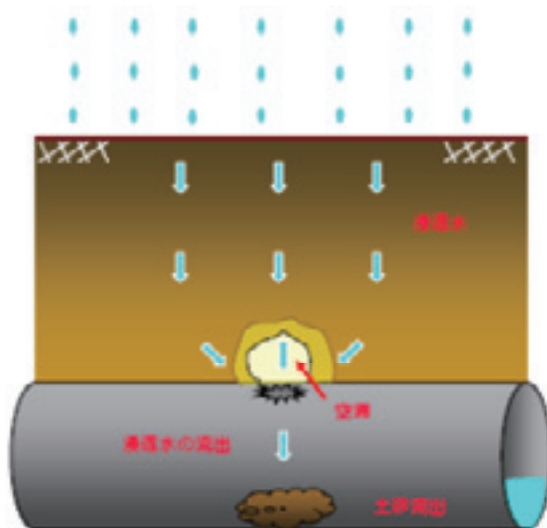


図-4.3 降雨浸透水による空洞形成メカニズム

②について、図-4.4 を示し、「普段は埋設管の下に位置している地下水位が、降雨により上昇することで地盤の状態が不安定となり下水管破損部から流出していくというメカニズムである。」としている。

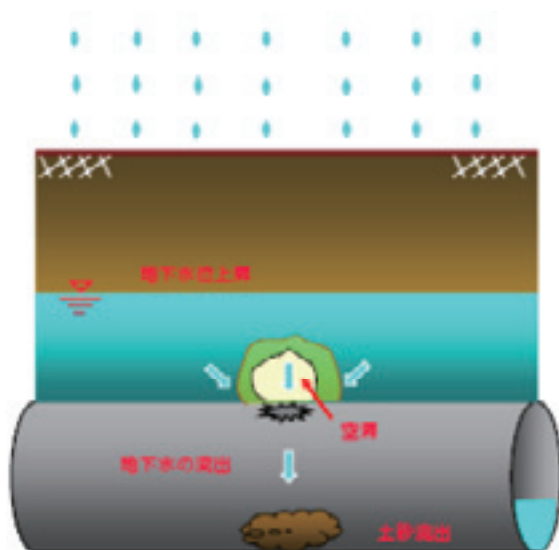


図-4.4 地下水位上昇による空洞形成メカニズム

③について、図-4.5 を示し、「特に近年多発している都市部のゲリラ豪雨等集中豪雨時に下水管内の水が溢れ周囲に流入、降雨が治まるとともに水が流出するというメカニズムである。」としている。

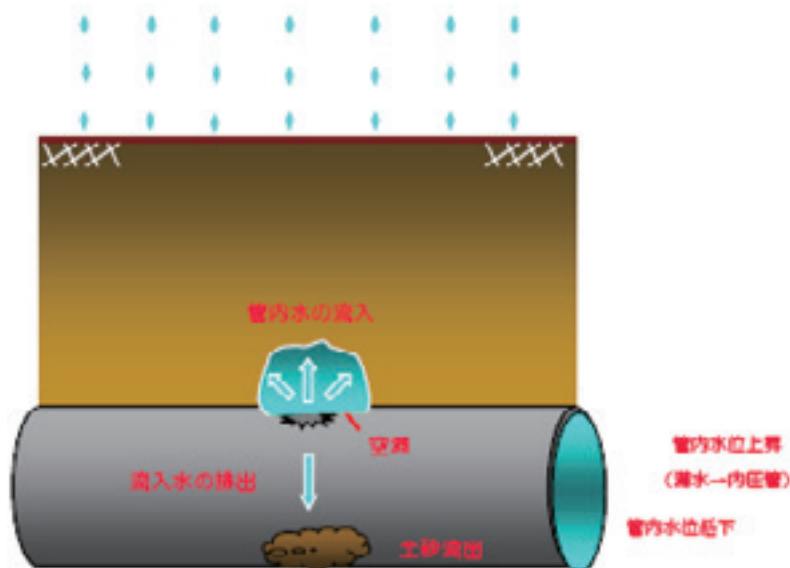


図-4.5 下水道管からの水の流出入の繰り返しによる空洞形成メカニズム

①の類似プロセスとして、水道等からの漏水が陥没を誘発している可能性がある。図-4.6 は英国の教科書 (Geoffrey F Read, Sewers Rehabilitation and New Construction, p50, ISBN:0470235640, ARNOLD) からのものである。水道や浅埋の下水道管からの漏水が、地下深くにある幹線へ流れ込み幹線周辺部の地盤がゆるむ様子を模式的に示している。尚、下水管の絵はいずれもレンガ管を示している。

③のプロセスは雨天時に圧力管状態となる合流式下水道や分流式下水道の雨水管で生じやすいと考えられる。一方、本管の老朽化や誤接合により雨天時不明水で圧力管になる汚水管でも生じると考えられる。

論文ではさらに、図-4.7 のような小型土層実験装置により、幅 5mm のスリットから水の流入と流出を繰り返すことで地盤に起こる変化を観察している。これは③の現象の再現を行っているものと考えられる。実験では、地盤材料や含水比、相対密度を変化させた様々な条件で地盤形状の変化を観測し排土量を計測することにより地盤変形・空洞形成をもたらす要因を考察した結果を示している (図-4.8~4.11)。「図-4.8、図-4.11 は初期段階から、図-4.9、図-4.10 はある程度のサイクルの進展で発生するようになる。サイクルが進むにつれて地盤全体が不安定となり図-4.8~4.11 の現象による影響がより大きくなってくる。」としている。



図-4.6 英国レンガ管崩壊メカニズムの概念図

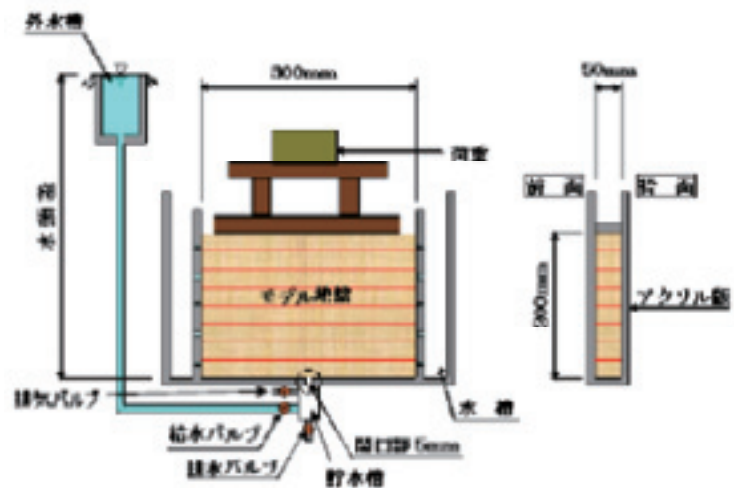


図-4.7 小型土層実験装置

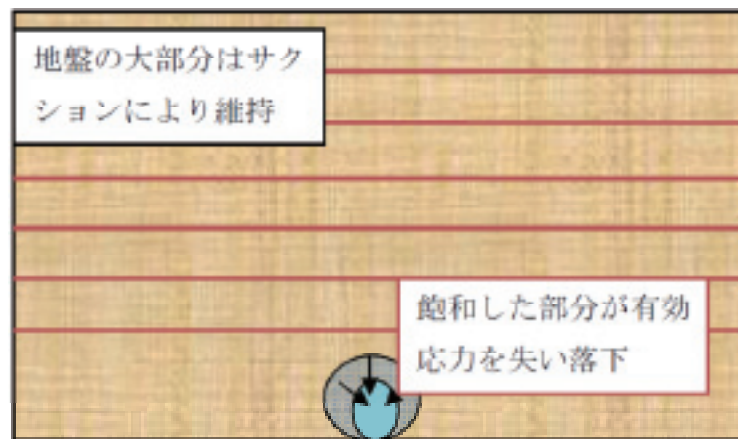


図-4.8 飽和土が間隙水圧の上昇により有効応力を失って落下

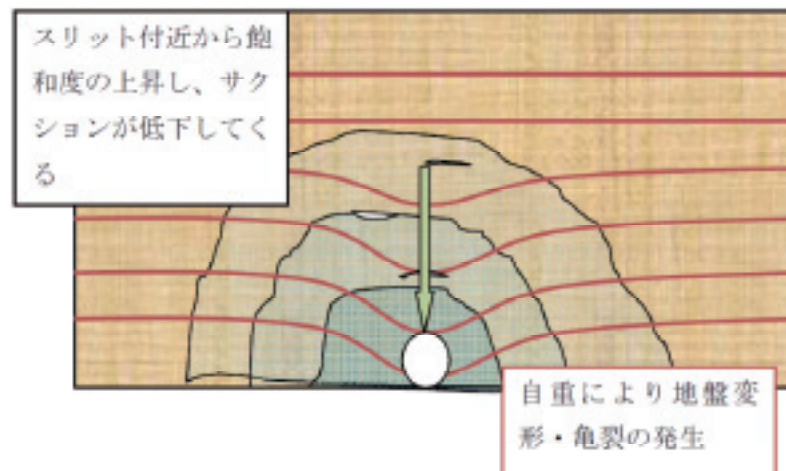


図-4.9 給排水の繰り返しでサクシオンの低下による周辺地盤の不安定化

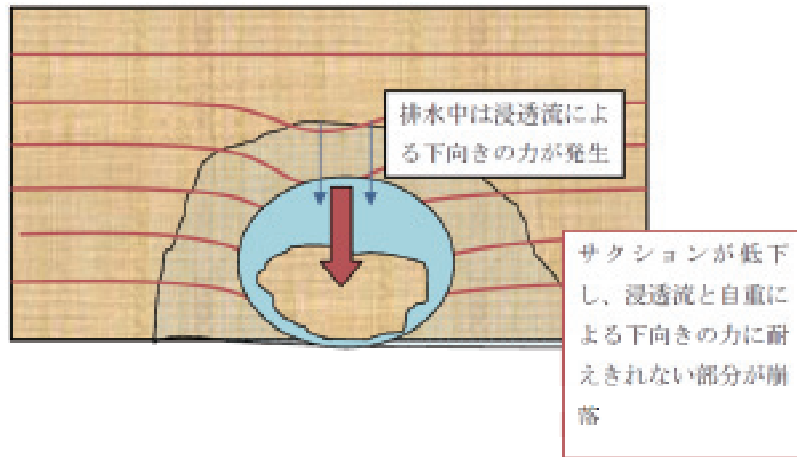


図-4.10 地盤の崩落

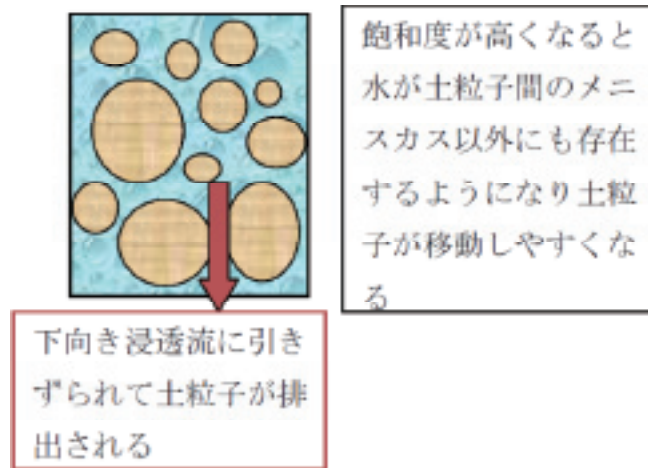


図-4.11 細粒分の流出

(3) 野中茂他：X線CTを用いた破損形状の違いによる管渠周辺地盤のゆるみ領域の評価（文献2）

野中他の論文は、地盤工学会での発表論文である。論文では、X線CTスキャナを用いた実験装置（図-4.12）により、管軸および管周方向に5mmのクラック等不具合が生じた下水管周辺地盤に発生するゆるみ領域を三次元的に可視化している。管軸方向の不具合の場合は、「管模型上方へ楕円状にゆるみが進展している。」（図-4.13）。管周方向の不具合の場合は、「土層下端の開口部両側から同心円状にふたつのゆるみが拡大し、合わさっている。」としている（図-4.14）。

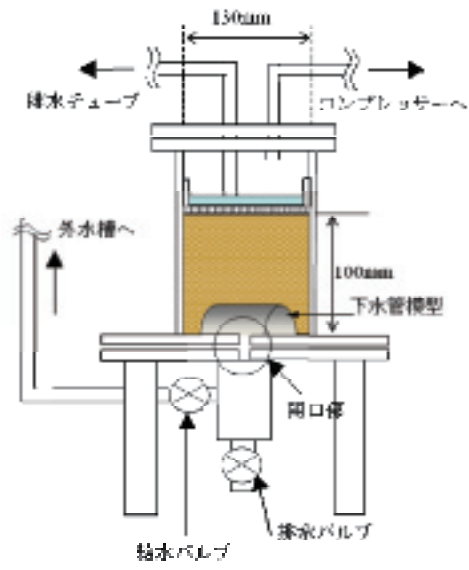


図-4.12 模型実験模式図

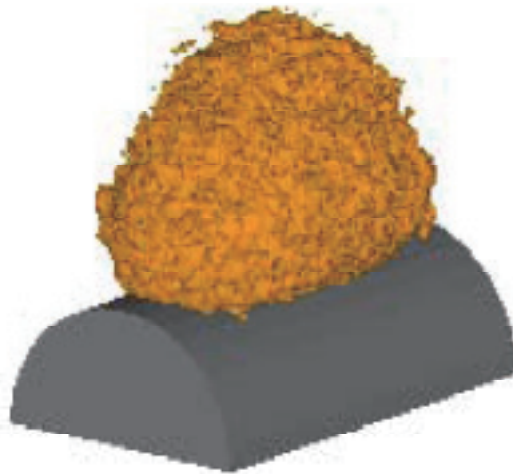


図-4.13 管軸方向破損密度低下領域・空洞領域

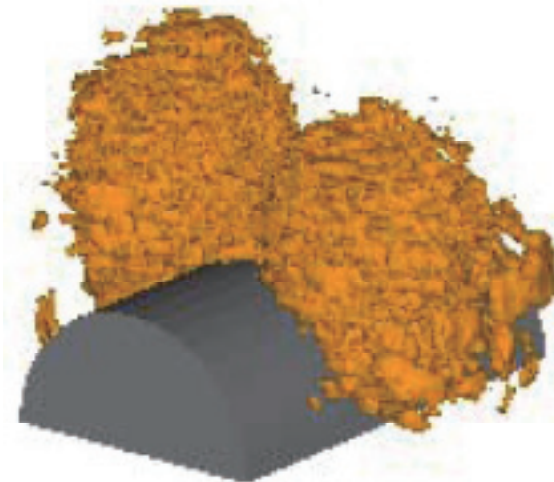


図-4.14 管周方向破損密度低下・空洞領域

(4) Sewerage Rehabilitation Manual 4th Edition Book (文献3)

文献3は、英国のWRC (Water Research Center, 水環境関連コンサルタント) 発刊の管路の更生マニュアルである。初版1984年、現在第4版が発刊されており、英国では下水管の改築修繕を計画する際の重要な書籍として位置づけられている。本文献では図-4.15~4.17を示し、管路への不具合発生から、地盤のゆるみと空洞形成へとつながるメカニズムを説明している図-4.15の不具合発生の第一段階として、「管の継ぎ手や取付管の接合不良により、浸入水が発生する。」としている。図-4.16の第二段階は、「地下水浸入、満管時の下水の浸出、浸入により、周辺地盤材料が管内に吸い込まれる。周辺地盤の支持力を失い、管が動き、接合部の不具合がひどくなる。これにより、周辺地盤材料の管内に吸い込まれる量も増える。」である図-4.17の第三段階は、「不均等な荷重により、管接合部の脱却が生じ、管体にひびわれ発生。管断面が変形し、破損発生、たわみ、蛇行が発生。カメラ車が走行不能になる。管内への周辺地盤材料吸い込みにより、空洞、ゆるみが拡大する。」である。

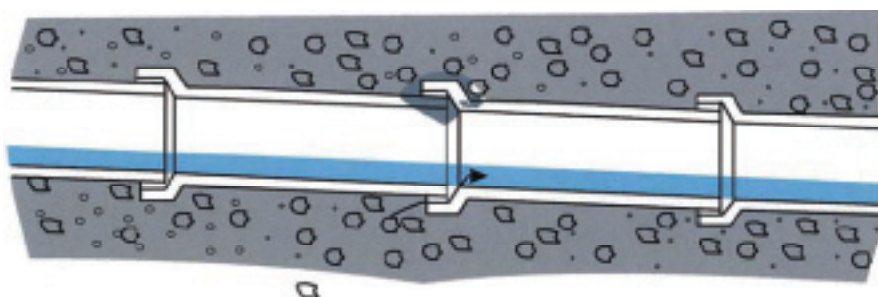


図-4.15 陥没発生メカニズム(第一段階)

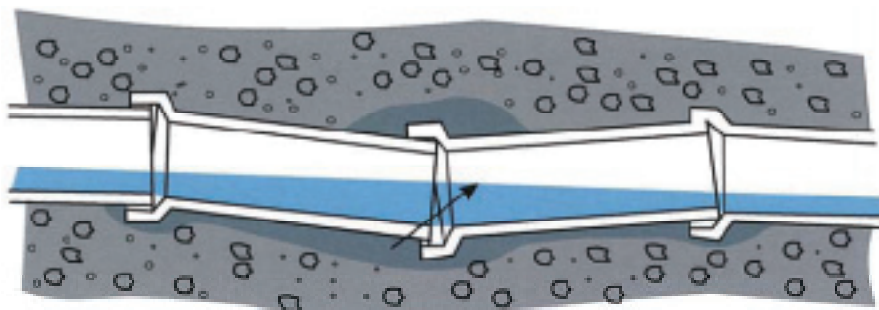


図-4.16 陥没発生メカニズム(第二段階)

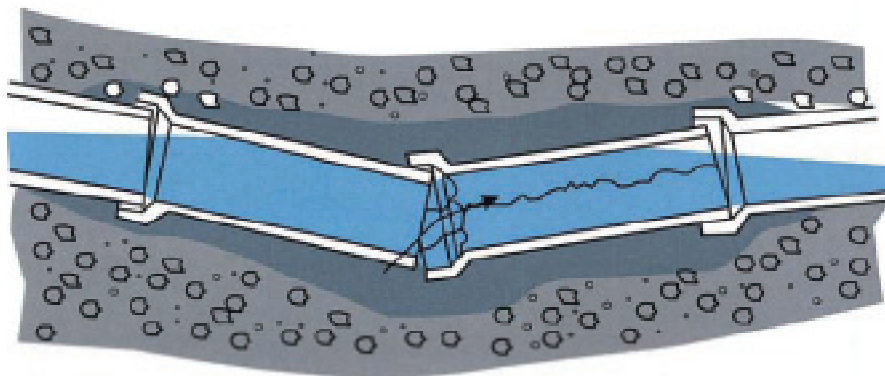


図-4.17 陥没発生メカニズム(第三段階)